

TEKOČEKRISTALNI PRIKAZALNIKI Z VELIKO GOSTOTO INFORMACIJ

Vabljeno predavanje, SD-88, Nova Gorica

Janez Pirš, Igor Muševič, Bojan Marin, Silva Pirš

Ključne besede: tekoči kristali, nematiki, feroelektriki, prikazalniki, elektrooptične lastnosti

POVZETEK: Podan je pregled modernih tekočekkristalnih tehnologij, ki omogočajo izdelavo ploščatih zaslonov z veliko gostoto informacij: superzasukane strukture v nematskih fazah, aktivno krmiljenje posameznega elementa v standardnih nematskih tekočih kristalih in uporaba spominskih efektov v smektičnih tekočih kristalih z višjo stopnjo urejenosti.

HIGH INFORMATION CONTENT LIQUID CRYSTAL DISPLAYS

Key Words: liquid crystals, nematics, ferroelectrics, displays, electrooptical properties

ABSTRACT: An overview of modern liquid crystal display technologies allowing for the manufacturing of flat, high information content displays is given: supertwisted structures in nematic mesophases, active matrix addressing of standard twist nematic displays and the use of the memory effects in smectic liquid crystals with higher degree of molecular order.

UVOD

Ena izmed bistvenih lastnosti naše visoko industrializirane civilizacije je izredna količina informacij in podatkov, zaradi česar nujno potrebuje ustrezne informacijske prikazalnike.

Med najrazličnejšimi tehnologijami prikazalnikov v zadnjih nekaj letih vedno bolj izstopajo tekočekkristalni prikazalniki (LCD) zaradi svojih specifičnih lastnosti:

- izredno majhna poraba energije
- nizka krmilna napetost (CMOS)
- ploščata geometrija in veliko svobode pri oblikovanju prikaza
- odlična vidljivost pri močni svetlobi

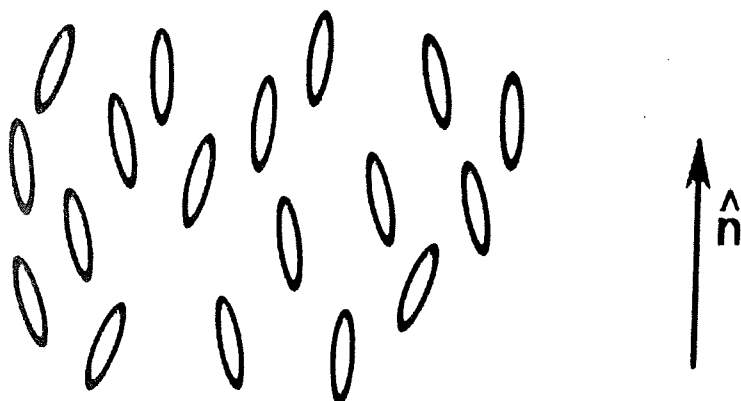
Na začetku razvoja so bili LCD prikazalniki namenjeni zlasti prikazu preprostih informacij, kot so: ure, kalkulatorji, digitalni elektronski instrumenti,... V zadnjih nekaj letih so odkritja novih elektrooptičnih efektov, kot tudi uspešna uvedba mikroelektronske tehnologije v tehnologijo LCD prikazalnikov (vgrajeni aktivni mikroelektronski elementi v posamezne prikazne elemente LCD prikazalnikov) omogočili uspešen prodor LCD prikazalnikov na področje informatike v uradih (osebni računalniki) miniaturnih televizijskih sprejemnikov, letalsko industrijo in vedno bolj tudi v avtomobilsko industrijo.

Kljub temu, da so bili tekoči kristali odkriti pred več kot 100 leti (Reinitzer⁽¹⁾, Lehman⁽²⁾) do prave, uspešne, praktične uporabe ni prišlo vse do odkritja elektrooptičnega efekta v zasukanih nematskih fazah⁽³⁾ („twisted nematic“ - TN prikazalniki).

Nematski tekoči kristali predstavljajo najpreprostejšo in najmanj urejeno obliko urejenih tekočin, ki jim s skupnim imenom pravimo tekoči kristali. Gre za tekočine, v katerih so dolge anizotropne organske molekule urejene tako, da so vzporedne med seboj, težišča molekul pa so naključno porazdeljena v prostoru kot pri običajnih izotropnih tekočinah.

Poleg nematskih tekočih kristalov obstajajo tudi višje oblike urejenosti molekul, kjer poleg urejenosti molekulskih dolgih osi „zamrznejo“ tudi druge komponente gibanja: molekule se uredijo v plasti, rotacija molekul okrog osi postane urejena. Tem višjim oblikam urejenosti v anizotropnih tekočinah pravimo **smektični tekoči kristali**.

Zaradi urejenosti dolgih molekul, ki so same po sebi optično anizotropne, imajo tudi tekoči kristali anizotropne elektrooptične magnetne in mehanske lastnosti, kar jim daje izredne možnosti za uporabo zlasti na področju elektrooptičnih prikazalnikov pa tudi na področju senzorjev (pritisk, temperatura,...)



Slika 1: urejenost molekul v nematskih tekočih kristalih

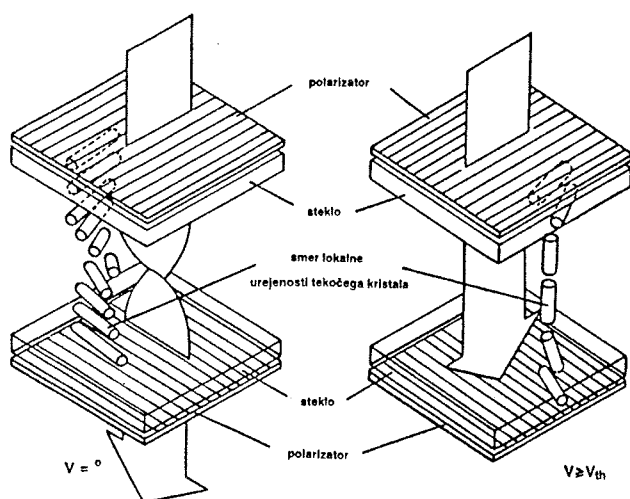
STANDARDNI TN PRIKAZALNIKI

Elektrooptični efekt zasukane nematske faze⁽³⁾ (TN - **twisted nematic phase**) je tehnološko najpreprostejši in najzanesljivejši način praktične uporabe tekočih kristalov. Gre za to, da pri polarizirani svetlobi pri prehodu skozi dvolumno sredstvo, v katerem optična os počasi rotira, smer polarizacije sledi orientaciji optične osi sredstva, če je produkt dvolumnosti (Δn) in debeline tekočerkristalne plasti (d) veliko večji od polovične valovne dolžine: $\Delta n d \gg \lambda / 2$.

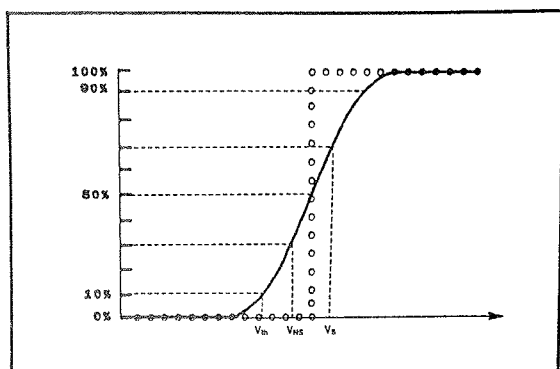
Tekočerkristalna celica, ki deluje na tem principu, je sestavljena iz dveh prekržanih polarizatorjev ($\alpha = 90^\circ$), med katerima je ustrezno debela plast tekočega kristala orientirana tako, da je smer orientacije molekul vzporedna s smerema polarizatorjev na obeh površinah, v plasti tekočega kristala od ene do druge površine pa opiše vijačnico (90°) (slika 2). Taka celica prepušča svetlobo. Zaradi anizotropnih dielektričnih lastnosti tekočih kristalov se lahko z električnim poljem med prozornima elektrodama pravokotno na plast tekočega kristala povzroči orientacija molekul v smeri električnega polja pravokotno na plast tekočega kristala. Tako orientirana plast tekočega kristala se za pravokotno vpadajočo svetlobo obnaša kot optično izotropno sredstvo, zato tekočerkristalna celica s prekržanimi polarizatorji svetlobe ne prepušča.

Taka tekočerkristalna celica torej predstavlja elektrooptični element, ki pod kontrolo električnega polja, bodisi prepušča, bodisi absorbira vpadno svetlobo. Z ustreznim oblikovanjem prozornih elektrod lahko tako dobimo poljuben prikaz najrazličnejših znakov (številke, α -numerični znaki, slikovni simboli,...). Tipičen odziv take tekočerkristalne celice na električno polje je prikazan na sliki 3.

Elektrooptični odziv tekočerkristalne celice očitno kaže, da je za krmljenje TN prikazalnika potrebna neka minimalna napetost V_{th} , prav tako pa pri krmlilnih napetostih, ki so večje od neke minimalne napetosti V_s prihaja do nasičenja. Obe napetosti V_{th} in V_s sta karakteristični za tekočerkristalno TN celico in sta določeni z geometrijo celice, elastičnimi konstantami tekočega kristala in anizotropijo dielektrične susceptibilnosti tekočega kristala. Zaradi simetričnosti tekočerkristalnih molekul njihova



Slika 2: shematski prikaz delovanja TN prikazalnika



Slika 3: elektrooptični odziv TN prikazalnika

orientacija ni odvisna od smeri krmilnega električnega polja. To omogoča uporabo izmeničnih krmilnih polj, kar močno poenostavlja problem krmiljenja tekočerkristalnih prikazalnikov, saj se na ta način lahko povsem izognemo problemu „zasenčenja“ krmilnega električnega polja zaradi nabojev v tekočem kristalu, prav tako pa je tako mogoče drastično zmanjšati elektrokemične reakcije v tekočem kristalu in krmilnih elektrodah.

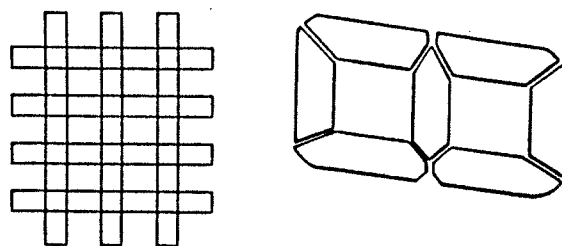
Uporabnost TN prikazalnikov je omejena na sorazmerno preproste prikaze, saj je kontrast teh prikazalnikov dober le v primeru statičnega krmiljenja vsakega prikaznega elementa posebej. V primeru prikaza z veliko gostoto informacij, je zaradi poenostavitve električne priključitve takega prikazalnika treba preiti na matrično organizacijo elektrod, ki zmanjša število priključkov za $M \times N$ slikovnih elementov iz $M \times N$ na $M + N$ priključkov (slika 4).

S tem postanejo posamezne elektrode medsebojno odvisne in tako je treba uvesti dinamično multipleksno krmiljenje, ki je kritično odvisno od strmine elektrooptičnega odziva. Maksimalno število vrst (N), ki jih je v multipleksnem načinu možno krmiliti, je določeno z razmerjem krmilne napetosti za izbran (V_S) in neizbran (V_{NS}) element ⁽⁴⁾ (slika 4).

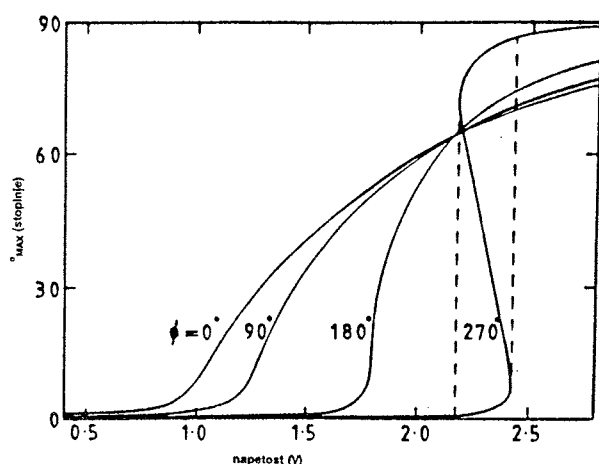
$$\frac{V_S}{V_{NS}} = \left(\frac{\sqrt{N+1}}{\sqrt{N-1}} \right)^{1/2}$$

Zaradi počasnega elektrooptičnega odziva TN prikazalnikov ($V_S/V_{NS} \approx 0,10$), ki je odvisen predvsem od razmerja elastičnih konstant za prečni in vzdolžni upogib K_3/K_1 („bend splay“, je na ta način mogoče krmiliti matrični prikazalnik z največ $100 \times N$ prikaznimi elementi. Za prikazalnike z večjo gostoto informacij je treba uporabiti dvojno ali štirikratno matriko elektrod ⁽⁵⁾, kar je dokaj komplicirano in drago zaradi povečanega

števila elektronskih krmilnih vezij. Zato je v tem primeru mnogo ustrežnejše uporabiti drugačen način krmiljenja ali drugačen elektrooptični efekt.



Slika 4: shematski prikaz 7-segmentne in matrične konfiguracije elektrod



Slika 5: napetostna odvisnost kota nagiba molekul v sredini plasti kot funkcija kota zasuka nematske strukture Φ

SUPERZASUKANI TEKOČEKRISTALNI PRIKAZALNIKI

Tekočerkristalni prikazalniki osnovani na standardni tehnologiji zasukane nematske faze (TN) imajo sorazmerno slabe lastnosti (kontrast, vidni kot,...), če jih uporabljamo za kompleksne prikaze z velikim številom prikaznih elementov. V letu 1972 je odkritje superzasukanih („supertwisted“ - STN) prikazalnikov ⁽⁶⁾ bistveno spremenilo možnosti za multipleksno krmiljenje prikazalnikov, osnovanih na uporabi nematskih tekočih kristalov. S povečanjem kota zasuka nematske strukture v območje 180°C do 360°C, se izgled kompleksnih prikazalnikov, ki delujejo v visokem multipleksnem razmerju, bistveno izboljša.

Razliko med standardnimi in superzasukanimi prikazalniki najbolj ilustrira ⁽⁷⁾ diagram odvisnosti kota nagiba tekočerkristalnih molekul v sredini tekočerkristalne plasti Θ_m (slika 5).

Strmina napetostne odvisnosti kota nagiba molekul Θ_m v sredini tekočerkristalne plasti bistveno narašča z večanjem kota zasuka in postane neskončna v območju $\Phi \approx 3\pi/2$. Pri večjih kotih se že začne pojavljati histereza v elektrooptičnem efektu. Natančna vrednost kota zasuka, pri kateri postane strmina elektrooptičnega odziva neskončna in s tem optimalna za multipleksno krmiljenje, je odvisna od vrste parametrov tekočerkristalne celice in tekočega kristala samega.

Visoke kote zasuka nematske strukture v praksi lahko dosežemo z ustreznim dopiranjem s kiralnimi primesmi. Ker je zasuk po drugi strani tudi pogojen z orien-

tacijo površine, točnost koncentracije kiralnih dopantov ni kritična.

Za razliko od standardnih TN prikazalnikov, ki uporabljajo le en način širjenja svetlobe skozi dvolomno plast tekočega kristala (redni ali izredni žarek), STN prikazalniki uporabljajo kombinacijo obeh načinov širjenja svetlobe. Kontrast in barva STN prikazalnikov je posledica interference med rednim in izrednim žarkom. Če sta polarizatorja pri STN prikazalniku orientirana pod kotom 60°, oz. 30° glede na smeri orientacije steklene površine, dobimo pozitivni kontrast („yellow mode“), ki ima temne znake na rumeni podlagi. Če enega izmed polarizatorjev zavrtimo za 90°, dobimo negativni kontrast („blue mode“) z belimi znaki na temno modrem ozadju. Če sta oba polarizatorja zasukana za 45° glede na smer orientacije steklene površine, je prepustnost T STN celice podana z analitičnim izrazom ⁽⁸⁾

$$T = \cos^2 \left(\pi \sqrt{(\Phi/\pi)^2 + (\Delta n/\lambda)^2} \right)$$

ki zavzame maksimalne vrednosti, če je:

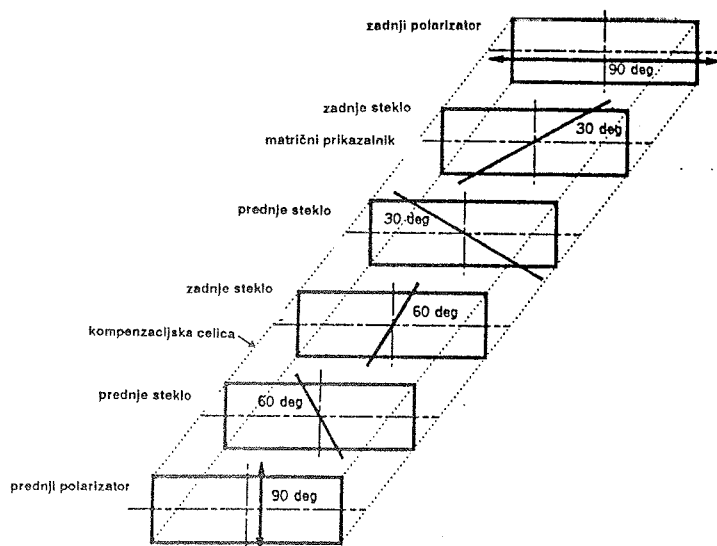
$$\frac{\Delta n}{\lambda} = \sqrt{q^2 - (\Phi/\pi)^2}$$

kjer je q celo število in λ valovna dolžina svetlobe

Na osnovi takega kriterija lahko določimo optimalno dvolomnost tekočega kristala in debelino celice, v odvisnosti od kota zasuka tekočerkristalne strukture v STN prikazalniku. Na podoben način je mogoče določiti tudi optimalne vrednosti za elastične konstante in anizotropijo dielektrične susceptibilnosti ⁽⁹⁾.

Tako lahko z ustrezno izbiro parametrov STN celice in tekočega kristala v praksi optimiziramo lastnosti STN prikazalnikov s koti zasuka od 180° do 240° in brez težav dosežemo multipleksno krmiljenje 200 : 1 s tem pa standardne dimenzije računalniških monitorjev 400 x 640.

Interferenčne barve, ki se pojavljajo pri STN prikazalnikih, niso najbolj atraktivne. Prav tako njihov izbor ni svoboden, ampak je pogojen z vizuelnim kontrastom tako, da je mogoče izbirati samo med rumenim in modrim načinom delovanja. Poleg tega temperaturne variacije parametrov tekočega kristala (Δn , elastične konstante,...) omejujejo območje delovanja STN prikazalnikov. Vsem tem pomanjkljivostim se je mogoče učinkovito izogniti z uvedbo barvne kompenzacije s pomočjo dodatne STN tekočerkristalne celice, izdelane kot zrcalna podoba osnovnega STN prikazalnika, to je z enako debelino, enakim tekočim kristalom, vendar z obratnim zasukom nematske strukture ⁽¹⁰⁾. Dodatna STN celica kompenzira razliko optičnih poti med rednim in izrednim žarkom, tako da se celotni sistem navzven ne obnaša več kot dvolomno sredstvo. Shematski prikaz takega dvojnega, kompenziranega črno-belega STN prikazalnika je prikazan na sliki 6.



Slika 6: shematski prikaz usmeritve polarizatorjev in orientacijskih slojev v kompenziranem DST prikazalniku s kotom zasuka $\Phi = 240^\circ$

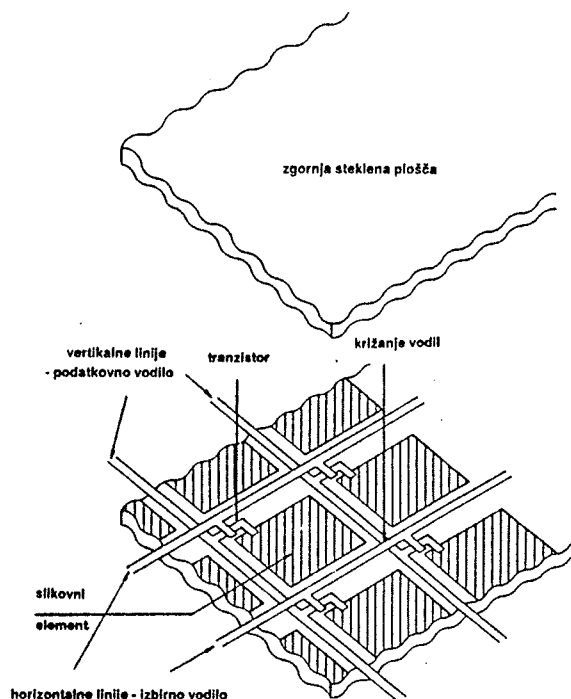
Treba je poudariti, da kompenzacijske STN celice ni treba krmiliti, saj je optična razlika med neizbranim in nekrmljenim segmentom minimalna. Po drugi strani se optične poti v izbranem segmentu STN prikazalnika in nekrmljeni kompenzacijski celici razlikujejo za $\approx 65\%$,⁽¹⁰⁾ kar kljub temu še vedno zadošča za dokaj dober črno-bel prikaz.

Dvoslojni kompenzirani črno-beli STN prikazalniki so komercialno že dostopni pod imenom DST ali NTN („Neutralised Twisted Nematic“). Omogočajo visok kontrast (≈ 15), nevtralen črno-bel izgled in bistveno ugodnejše temperaturno območje delovanja. Če se jih kombinira z R,G,B barvnimi filtri, je mogoče izdelati barvni STN prikazalnik z visoko gostoto informacij⁽³²⁾. Prvi tak TNT barvni televizor (Seiko/Epson) je bil predstavljen na Japan Display Show in SID Symposium 1988.

Vsekakor predstavlja STN tehnologija zelo uspešno in tehnološko izdelano rešitev za ploščate LCD zaslone za prikaz velikega števila informacij. Edino omejitev pri uporabnosti predstavlja sorazmerno počasen odziv (> 100 ms), ki omejuje njihovo uporabnost v glavnem na prikaz statičnih informacij (računalniški monitorji...).

PRIKAZALNIKI Z AKTIVNO MATRIKO

Težave z multipleksnim krmiljenjem TN prikazalnikov zaradi premalo strmega elektrooptičnega odziva, najbolj efektno premagamo z vgradnjo nelinearnih mikroelektronskih elementov v vsak prikazani element matričnega tekočerkristalnega prikazalnika. Tak nelinearen element je lahko dioda^(11,12,13), MIM^(14,15) ali TFT tranzistor. Najboljše rezultate dajejo TFT tranzistorji^(16,17). (Slika 7.)



Slika 7: konvencionalna zgradba aktivne matrice

Vgradnja aktivnega elementa v bistvu zagotovi pogoje statičnega krmiljenja TN elektrooptičnih slikovnih elementov tako, da kontrast, vidni kot in preklopni časi TFT TN prikazalnikov z naraščajočim številom slikovnih elementov ostajajo nespremenjeni. Za razliko od običajnih TN multipleksno krmiljenih prikazalnikov je v TFT TN prikazalnikih zaželen tekoči kristal, s čimbolj položnim elektrooptičnim odzivom, kar omogoča boljši izbor sivih nivojev. Prav tako je za uspešno delovanje pomembna čim večja upornost in majhna dvolomnost tekočega kristala.

Ideja o realizaciji kompleksnih tekočokristalnih prikazalnikov z vgradnjo aktivnih elementov je že zelo stara ⁽¹⁸⁾, vendar je šele razvoj tehnologije amorfne silicija v 1979 prinesel zares uporabne rezultate. Prikazalnike z aktivno matriko že komercialno proizvajajo, zlasti za potrebe miniaturnih televizijskih sprejemnikov. Največja trenutno komercialno dosegljiva velikost je 7 inch (diagonala) ⁽¹⁹⁾. Z uporabo tankoplastnih R, B, G barvnih filtrov je mogoče zagotoviti tudi kvalitetno barvno sliko.

Razvojna prizadevanja na področju prikazalnikov so usmerjena zlasti v obe vodilni tehnologiji: amorfni silicij in polisilicij. Pri tem nedvomno velja, da je daleč najbolj izdelana tehnologija amorfne silicija, ki tudi zaenkrat daje najboljše rezultate ^(16,17).

Najbolj običajen postopek izdelave tankoplastnega tranzistorja na bazi amorfne silicija, je prikazan na sliki 8. Gre za štiristopenjski proces ⁽²⁰⁾:

- kovinsko „gate“ vodilo za izbirne impulze pri matričnem krmiljenju
- izolacijska Si_3N_4 (SiO_2) plast, plast amorfne silicija in a^+ silicija
- prozorne ITO elektrode
- metalizacija „source-drain“ kontaktov in podatkovnega vodila

Bistveni del postopka je zaporedna depozicija treh plasti (Si_3N_4 , amorfni Si, a^+ Si) v PECVD reaktorju pri temperaturi $\sim 300^\circ\text{C}$, brez vmesne prekinitve, kar bistveno zmanjša možnost nastanka defektov na stikih posameznih plasti TFT tranzistorja.

Sami tehnološki postopki izdelave a-Si TFT tranzistorjev so dobro znani zlasti po zaslugi obsežnega razvojnega dela na področju fotonapetostnih aplikacij v zadnjih letih ⁽²¹⁾. Osnovni problem te tehnologije pri uporabi v tekočokristalnih prikazalnikih je velika fotoprevodnost takih sistemov, ki lahko povsem onemogoči delovanje samega prikazalnika. Zato je potrebno vse aktivne elemente v prikazalnikih z aktivno matriko zaščititi s svetlobnim ščitom (npr.: Cr), kar seveda dodatno zakomplicira in podraži postopek.

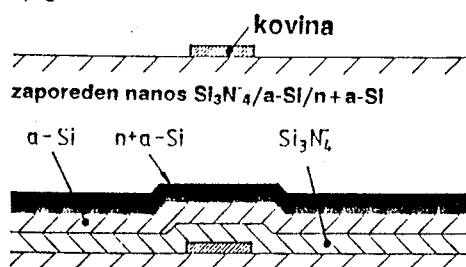
Kljub dobro izdelani tehnologiji in uspešnim rezultatom TFT na osnovi amorfne silicija, v zadnjih letih vse več pozornosti posvečajo razvoju tehnologije TGT na osnovi polisilicija, ki ima vrsto prednosti ^(22,23):

- manjši izgubni tokovi
- večja gibljivost nosilcev naboja, kar v načelu omogoča izdelavo LSI krmilnih vezi, hkrati z aktivno TFT matriko v tekočokristalnem prikazalniku

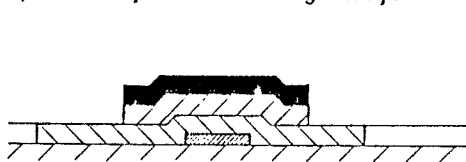
- manjša občutljivost na svetlobo
- večja stabilnost

Vse te prednosti vsaj zaenkrat še ne morejo odtehtati osnovnega problema tehnologije polisilicijskih TFT, to je dejstva, da celotni postopek poteka pri visokih temperaturah ($\sim 1000^\circ\text{C}$). To namreč zahteva kvarčne substrat in tako čezmerno podraži komercialno izdelavo takih prikazalnikov. Tako je razvojno delo v zadnjih nekaj letih usmerjeno v razvoj nizkotemperaturnih ($\sim 600^\circ\text{C}$) tehnoloških postopkov, ki bi bili kompatibilni s standardnimi steklenimi substrati, uporabljanimi v proizvodnji tekočokristalnih prikazalnikov. Kljub vrsti precej vzpodbudnih rezultatov ⁽²⁴⁾ dosežene lastnosti tako izdelanih TFT še ne dosegajo specifikacij TFT, izdelanih po standardnih visokotemperaturnih postopkih.

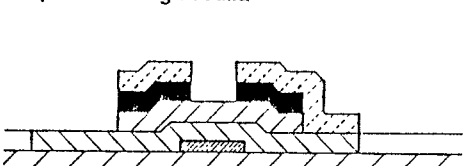
1) „gate“ elektrode in izbirno vodilo



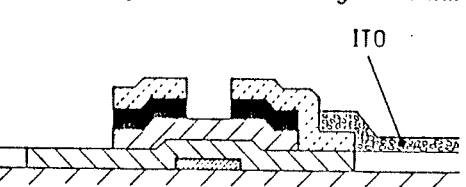
2) oblikovanje otoka amorfne silicija



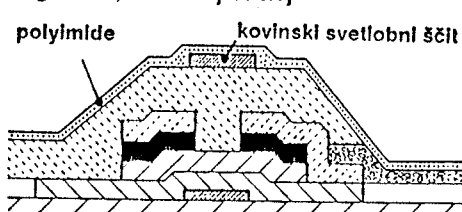
3) nanos in oblikovanje „source“ in „drain“ kontaktov ter podatkovnega vodila



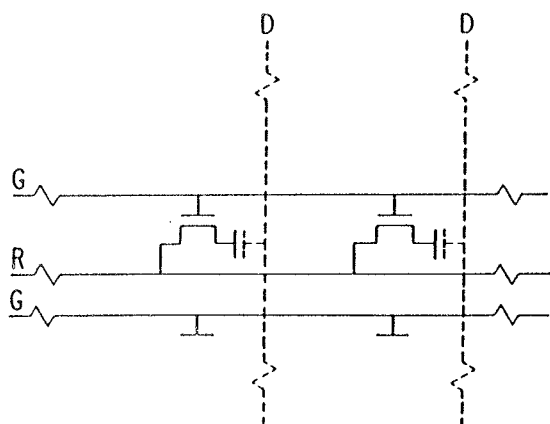
4) oblikovanje elektrode slikovnega elementa



5) končna pasivacija, nanos in oblikovanje svetlobnega ščita, orientacijski sloj



Slika 8: tipičen a-Si TFT proizvodni proces

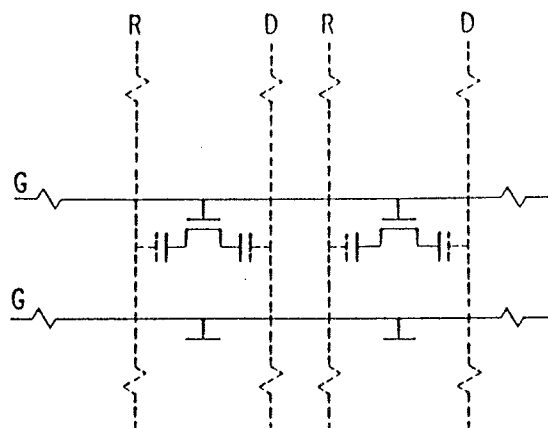


Slika 9: SLM vezje: g = „gate“ vodilo, r = referenčno vodilo, d = podatkovno vodilo; Črtkane črte predstavljajo tisti del vezja, ki je izveden na nasprotni plošči

Poleg tehnoloških problemov same izdelave TFT igra pomembno vlogo tudi sama zasnova aktivne matrike: klasična zasnova aktivne matrike, ki jo je predlagal že Brody ⁽¹⁸⁾ (slika 7.), je v bistvu TFT analogija MOS dinamičnega pomnilnika (DRAM). Njena osnovna pomanjkljivost je v tem, da tako podatkovno, kot izbirno vodilo poteka po istem substratu. Tako lahko vsak stik skozi „gate“ transistorja ali na križiščih vodil povzroči izpad celotne vrste in kolone prikazalnika, kar je povsem nesprejemljivo. To pomanjkljivost je mogoče zelo uspešno odpraviti z drugačno konstrukcijsko zasnovo prikazalnika, ki je zasnovana tako, da podatkovni in izbirni vodili potekata ločeno, vsako na svojem steklu tekočerkristalne celice. Tipična primera take zasnove sta „Single Level Metal“ (SLM) ^(25,26) (Slika 9.) in „Capacitively Coupled Transistor“ (CCT) ⁽²⁷⁾ (Slika 10).

Taka zasnova aktivne matrike odpravi križanje vodil in linijske defekte v primeru stika skozi „gate“ transistorja. Ti krmlilni shemi lahko dopolnimo tako, da v vsak slikovni element namesto enega, vgradimo dva transistorja. To omogoča, da se lahko defektni transistor odstrani z laserjem in tako izboljša izkoristek in komercialno uspešnost proizvodnje.

Prikazalniki z aktivno matriko vsekakor predstavljajo tehnično najpopolnejšo rešitev za ploščate zasione z velikim številom informacij. Ker uporaba aktivne matrike omogoča idealne pogoje za delovanje tekočerkristalnih slikovnih elementov, taki prikazalniki zagotavljajo ustrezno dinamiko (~30 ms), dober kontrast (> 20) in vidni kot (60°) in tako tehnično izpolnjujejo vse pogoje za nadomestilo katodne cevi. Edina težava takih prikazalnikov je seveda njihova cena, ki jih zaenkrat omejuje na področja profesionalne uporabe, kot je npr.: letalska industrija, posebni nameni,...



Slika 10: CCT vezje: simboli in črtkane linije imajo enak pomen kot na sliki 9

FEROELEKTRIČNI TEKOČEKRIKSTALNI PRIKAZALNIKI

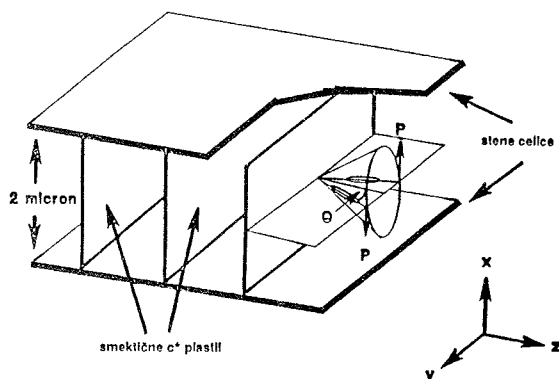
Vse dosedanje praktično pomembne tehnične rešitve uporabe tekočih kristalov so bile omejene na uporabo nematskih tekočih kristalov kljub temu, da smektični tekoči kristali zaradi višje stopnje urejenosti molekul ponujajo vrsto novih možnosti, med katerimi so zlasti pomembni spominski efekti.

V zadnjih letih se je položaj v tem smislu bistveno spremenil, tako po zaslugi originalne ideje ⁽²⁸⁾, kot tudi zaradi splošnega razvoja tehnologije in materialov za tekočerkristalne prikazalnike. Tako so postali smektični tekoči kristali, oz. točneje kiralni smektični C (SmC*) tekoči kristali predmet intenzivnega tehnološkega razvoja. Predstavljajo eno izmed potencialno najbolj obetavnih tehnoloških rešitev izdelave ploščatega LCD zaslona, z visoko gostoto prikaznih elementov, hitrim odzivom (kompatibilni s signali TV) in dobrim vidnim kotom.

Že natančna teoretična analiza ⁽²⁹⁾ pokaže, da morajo imeti vse kiralne smektične tekočerkristalne faze z nagnjenimi molekulami feroelektrične lastnosti - to je, da mora v takih tekočerkristalnih sistemih obstajati spontana polarizacija, ki je pravokotna na os molekul. Seveda makroskopski vzorci takih lastnosti ne kažejo, ker se tekočerkristalna struktura brez zunanjih vplivov (električno polje, površina,...) uredi tako, da polarizacijski vektor opisuje vijačnico in je tako poprečna vrednost polarizacije na razdalji enega hoda vijačnice (nekaj μm) enaka nič.

Princip delovanja feroelektričnega tekočerkristalnega prikazalnika je prikazan na sliki 11 ⁽³⁰⁾.

Steklene stene tekočerkristalne celice s prozornimi elektrodami so prekrite z orientacijsko plastjo, ki orien-



Slika 11: površinsko stabilizirani feroelektrični prikazalnik - obe ekvivalentni orientaciji molekul ustrezata stanjema „gori“ in „doli“

tira molekule vzporedno s površino. Pri ohlajanju tekočega kristala iz izotropne faze skozi nematsko in SmA fazo v SmC* fazo se molekule tekočega kristala uredijo v plasti, ki so pravokotne na stekleno površino in na prednostno smer orientacijske plasti. Če je debelina celice manjša od dolžine vijačnice, ki bi jo v makroskopskem vzorcu opisala polarizacija, molekule zaradi svojega nagiba Θ v plasti v SmC* fazi lahko zavzamejo le dve orientaciji: $+\Theta$ in $-\Theta$ glede na normalo na ravnino. Tako z vplivom orientirane površine in ob ustreznem vrstnem redu faznih prehodov (izotropna faza $\rightarrow$ nematska faza $\rightarrow$ SmA faza $\rightarrow$ SmC* faza) dobimo makroskopsko orientirano plast SmC* kristala, v kateri sta možni samo dve orientaciji molekul (Surface Stabilized

Ferroelectric Liquid Crystal - SSFLC). Dovoljenima orientacijama molekul ustreza električna polarizacija pravokotno na stene celic navzgor, oz. navzdol. Obe legi molekul sta energijsko enakovredni in stabilni (spomin!), pod vplivom električnega polja pa lahko molekule prehajajo iz ene lege v drugo.

Optično lahko obe dovoljeni legi TK molekul v SSFLC detektiramo z uporabo prekržanih polarizatorjev, pri katerih se smer enega polarizatorja ujema z eno izmed dovoljenih leg molekul ($+\Theta$). Če izberemo tekoči kristal tako, da je kot nagiba Θ tekočerkristalnih molekul v plasti SmC* mezofaze enak $22,5^\circ$, in če zagotovimo tako debelino tekočerkristalne celice d , da je izpolnjen pogoj:

$$\Delta n d = \lambda / 2,$$

kjer je Δn dvolomnost tekočega kristala,

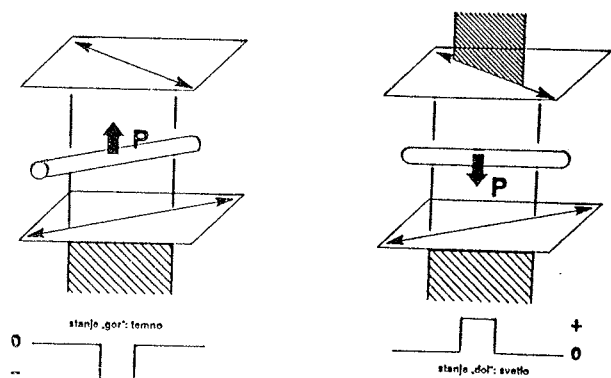
d debelina celice in

λ valovna dolžina svetlobe

dobimo električno kontroliran optični preklopnik. Le-ta v stanju, ko so molekule orientirane vzdolž enega izmed polarizatorjev ne prepušča svetlobe, pri nasprotni legi molekul (45° glede na polarizatorja) pa svetlobo prepušča (Slika 12.), saj se polarizacija pri prehodu skozi tekočerkristalno celico zavrti za 90° in tako nemoteno pride skozi drugi polarizator.

Za razliko od nematskih tekočih kristalov, ki z električnim poljem interagirajo le zaradi anizotropije dielektrične susceptibilnosti, imajo feroelektrični tekoči kristali zaradi svoje spontane polarizacije znatno močnejšo sklopitev z električnim poljem. Zato in pa zaradi dejstva, da je viskoznost za rotacijo molekul znotraj plasti SmC* mezofaze majhna, je odzivni čas SSFLC prikazalnikov:

$$\tau \propto \frac{\gamma}{P \cdot E}$$



Slika 12: Princip delovanja SSFLC prikazalnika

kjer je γ - rotacijska viskoznost

P - polarizacija

E - električna poljska jakost

izredno kratek (nekaj μ s). Tako so SSFLC prikazalniki lahko kompatibilni z obstoječimi TV kontrolnimi signali.

Kljub vrsti očitnih prednosti, imajo SSFLC prikazalniki tudi nekaj resnih pomanjkljivosti, oz. tehnološko še ne ustrezno rešenih problemov, kot so: debelina SSFLC celice $\sim 2 \mu$ m (ni kompatibilna s standardno LCD tehnologijo), prevelika dvolumnost znanih SmC* tekočih kristalov, premajhen kot nagiba v plasti ($< 20^\circ$), težave pri formiranju sive skale (samo dve možni legi molekul!).

Zato so v sedanji fazi glavna RR prizadevanja usmerjena k razvoju širokotemperaturnih SmC* tekočih kristalov, s sorazmerno dolgo vijačnico ($> 10 \mu$ m), majhno optično anizotropijo in čim večjo spontano polarizacijo, razvoju novih orientacijskih slojev, ki bi z električno kontroliranim formiranjem orientacijskih defektov omogočili izvedbo sive skale...

Te zahteve si seveda na nek način medsebojno nasprotujejo, vendar izredni uspehi pri razvoju prototipnih SSFLC prikazalnikov⁽³¹⁾ v zadnjih letih kažejo na to, kako zelo si na tem področju prizadevajo vsi proizvajalci tekočokristalnih prikazalnikov in, da do komercialno uspešnih rezultatov ni več daleč.

ZAKLJUČEK

Tekočokristalni prikazalniki tako kljub skromnim začetkom pred dobrimi desetimi leti, ko so se uveljavili kot ceneni instrumentalni, urini in kalkulatorski prikazalniki, zavzemajo vse pomembnejše mesto v informacijskih sistemih in so dejansko najintenzivnejše razvijajoča se skupina prikazalnikov.

Standardni statično in multipleksno krmiljeni TN prikazalniki v celoti pokrivajo svetovno tržišče digitalnih ur in kalkulatorjev, na široko pa so se uveljavili tudi kot ceneni, zanesljivi in zelo fleksibilni instrumentalni prikazalniki.

Superzasukani prikazalniki se v zadnjih dveh letih izredno uspešno uveljavljajo na tržišču osebnih računalnikov, saj predstavljajo prvo resnično uspešno tehnološko rešitev tako dolgo iskanega ploščatega zaslona za računalniški monitor.

Tekočokristalni prikazalniki se s tehnološkimi rešitvami, ki jih ponuja mikroelektronska tehnologija, uporabljana v aktivnih matričnih prikazalnikih, uspešno vključujejo tako na področje splošne uporabe, kot miniaturni barvni TV zasloni pa tudi na področje najzahtevnejših sistemov, kot je npr.: HDTV. Zaradi sorazmerno drage tehnologije, ki pa je šele na svojem začetku, je njihova uporaba zaenkrat omejena na specialne naročnike, kot je npr.: letalska industrija,...

Feroelektrični prikazalniki so na samem začetku tehnološkega razvoja. Kljub temu obetajo združiti preprosto in ceneno tehnologijo TN in STN prikazalnikov s spominom, kompleksnostjo in hitrostjo prikaza, ki ga zahteva HDTV in tako končno uresničiti stare želje po ploščatem, nizkonapetostnem nadomestku za katodno cev.

LITERATURA

1. F.Reinitzer, *Montash Chem.* 9 (1988) 421
2. O.Lehman, *Z.Krist.* 18 (1890) 464
3. M.Schadt and W.Heftrich, *Appl.Phys.Lett.* 18 (1971) 127
4. P.M.Alt and P.Pleshko, *IEEE Trans.Electr.Devices* ED-21 (1974) 146
5. E.Kaneko, *Mol.Cryst.Liq.Cryst.* 139 (1986) 81
6. C.M.Waters and E.P.Raynes, *UK Patent GB 2 123 163*
7. E.P.Raynes, *Mol.Cryst.Liq.Cryst.Lett.* 4 (1986) 1
8. E.P.Raynes, *Mol.Cryst.Liq.Cryst.Lett.* 4 (1987) 159
9. E.P.Raynes, R.A.Smith, *Eurodisplay proc.* 100, 1987
10. K.Katoh, Y.Endo, M.Akatsuka, M.Ohgawara and K.Savada, *Jap.J.Appl.Phys.* 26 (1987) L1784
11. S.Szydlowski et al., *Japan Display* 1983, p.416
12. S.Togashi et al., *Eurodisplay* 1984, p.141
13. Z.Yaniv et al., *SID 1986 Digest*, p.278
14. S.Maezawa et al., *SID 1987 Digest*, p.54
15. M.Toyama et al., *SID 1987 Digest*, p.122
16. H.Tanaka et al., *SID 1987 Digest*, p.140
17. D.E.Castleberry, G.E.Possin, *SID Symposium* 88, p.232
18. T.P.Brody et al., *IEEE Trans Electr.Dev.* ED20, 995 (1973)
19. S.Hotta et al., *SID 1986 Digest*, p.296
20. W.W.Piper et al., *SPIE Proc.*, vol 617, jan. 1986
21. See for instance: *Semiconductor and Semimetals*, vol 21 J.I.Pankova ed. Academic Press Inc., London 1894
22. S.Morozumi et al., *SID 1983 Digest*, p.156
23. S.Morozumi et al., *SID 1984 Digest*, p.316
24. GEC Research Press Release, July 1987
25. C.Hilsum and R. van de Poel, *Displays*, jan. 1986, p.37
26. B.Diem et al., *Japan Displays* 1986, p.88
27. N.Bryer et al., *Japan Display* 1986, p.80
28. N.A.Clark and S.T.Lagerwall, *Appl.Phys.Lett.*, 36 (1980), 899
29. R.B.Meyer, L.Liebert, L.Strzelecki and P.Keller, *J.Physique Lett.* 36 (1975) L-69
30. S.T.Lagerwall, J.Wahl and N.A.Clark, *Conf.Record Int.Display Research Conference*, San Diego (1985) 213
31. S.Matsumoto et al., (Toshiba) *SID Symposium* 88, p.49
32. N.Kimura et al., (Sharp), *SID Symposium* 88, p.49

dr. Janez Pirš, dipl. ing.
Igor Muševič, dipl. ing.
Bojan Marin, dipl. ing.
Silva Pirš, ing.
Institut Jožef Stefan
Jamova 39, Ljubljana